

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**PŘENOS PŘESNÉHO ČASU A STABILNÍ FREKVENCE
OPTICKOU SÍTÍ**

TRANSMISSION OF ACCURATE TIME AND STABLE FREQUENCY THROUGH THE OPTICAL NETWORK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Kratochvíl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Münster, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

Student: Petr Kratochvíl

ID: 174333

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Přenos přesného času a stabilní frekvence optickou sítí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je detailní teoretický rozbor problematiky přesného času a stabilní frekvence. Důraz bude kladen na důležité parametry obou aplikací (koherentní délka, fázový šum, stabilita hodin, apod.). Cílem práce bude návrh zapojení pro realizaci přenosu stabilní frekvence optickou trasou a dlouhodobé měření a vyhodnocení přenosu přesného času.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika : Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] MAJOR, F. G. The quantum beat: principles and applications of atomic clocks. 2nd ed. New York: Springer, 2007. ISBN 0387695338.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 29.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Přenos přesného času a stabilní frekvence pomocí satelitní technologie začíná pomalu narážet na své limity, což logicky vede k hledání náhrady, která umožní další zvyšování přesnosti. Jako velmi dobrou náhradou se v tomto případě ukazují optická vlákna, která v posledních desetiletích prošla obrovským pokrokem a jejich nasazením na všech páteřních linkách usnadní začít vědecké i komerční využívání přenosu času a frekvence přes toto médium.

KLÍČOVÁ SLOVA

přesný čas, přenos času, přenos přesného času, stabilní frekvence, přenos frekvence, přenos stabilní frekvence, přenos času a frekvence, optická vlákna, přenos optickými vlákny

ABSTRACT

Transmission of accurate time and stable frequency using satellite technology is slowly starting to rise to its limits, which logically leads to the search for a refund that will further increase accuracy. A very good substitute in this case is optical fiber, which has undergone great progress in recent decades and has helped to launch scientific and commercial use of time and frequency over this link on all connecting lines.

KEYWORDS

accurate time, time transfer, accurate time transfer, stable frequency, frequency transfer, stable frequency transfer, optical fiber, transfer by optical fibers

KRATOCHVÍL, Petr. *Přenos přesného času a stabilní frekvence optickou sítí*. Brno, Rok, 44 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Přenos přesného času a stabilní frekvence optickou sítí“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Münstroví, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci a panu Martinu Wetterovi za praktické ukázky a informace o využití optických vláken v praxi.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	9
1 Čas	10
1.1 Definice sekundy	10
1.2 Masery	10
1.2.1 Typy maserů	11
1.2.2 Použití maserů	12
2 Frekvence	13
2.1 Koherentní záření	13
2.1.1 Časová koherence	13
2.1.2 Prostorová koherence	13
2.1.3 Koherenční délka	14
2.1.4 Lasery	14
3 Způsoby přenosu času a frekvence	17
3.1 Metody přenosu	17
3.1.1 One-way	17
3.1.2 Two-way	18
3.1.3 Common view	18
3.2 Typy přenosu	19
3.2.1 Radiové sítě	20
3.2.2 Satelitní sítě	20
3.2.3 Počítačové sítě	20
4 Přenos po optických vláknech	22
4.1 Využití stávající sítě	22
4.1.1 Temná vlákna	22
4.1.2 Vlnový multiplex	22
4.1.3 Sdílení kapacity	23
4.2 Přenos času	23
4.3 Přenos frekvence	23
5 Stabilita optické trasy	25
5.1 Útlum vlákna	25
5.1.1 Absorbce	25
5.1.2 Rozptyl	25
5.2 Disperze	26

5.2.1	Chromatická disperze	27
5.3	Teplota vlákna	27
5.4	Zpoždění vlákna	27
6	Návrh měření času a frekvence	28
6.1	Přenos času	28
6.1.1	Adaptér pro přenos času	28
6.1.2	Ověřovací měření času	28
6.1.3	Návrh měření času	29
6.2	Přenos frekvence	29
6.2.1	Zařízení pro přenos frekvence	30
6.2.2	Ověřovací měření frekvence	30
6.2.3	Návrh měření frekvence	30
7	Výsledky měření	32
7.1	Ověřovací měření času	32
7.2	Měření času	32
7.3	Ověřovací měření frekvence	33
7.4	Měření frekvence	34
7.5	Webové rozhraní	36
8	Závěr	39
	Literatura	40
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	43
A	Obsah přiloženého CD	44

Seznam obrázků

1.1	Principiální schéma casiového maseru [1]	11
1.2	Atomové hodiny o velikosti chipu. Rozměry $(4 \times 3, 5 \times 1, 45)$ cm [2] .	12
2.1	Porovnání šířky pásma emitovaného záření při spontánní a stimulo- vané emisi. Převzato z [3].	16
3.1	Jednosměrný přenos	17
3.2	Obousměrný přenos	18
3.3	Common view	19
5.1	Měrný útlum optického vlákna	26
6.1	Schéma zapojení přenosu času. Část schéma převzata z [4].	29
6.2	Schématický nákres trasy pro měření přenosu času	30
6.3	Schématický nákres trasy pro měření přenosu frekvence	31
7.1	Schématický nákres trasy pro měření přenosu frekvence	32
7.2	Graf přesnosti hodin v závislosti na době měření	33
7.3	a) Graf šumu optického signálu. b) Frekvenční posun způsobený prů- chodem paprsku přes měřené vlákno	34
7.4	a) Graf šumu optického signálu. b) Frekvenční posun způsobený prů- chodem paprsku přes měřené vlákno	35
7.5	a) Graf šumu optického signálu. b) Frekvenční posun způsobený prů- chodem paprsku přes měřené vlákno	35
7.6	a) Graf šumu optického signálu. b) Frekvenční posun způsobený prů- chodem paprsku přes měřené vlákno vlákno	36
7.7	Úvodní stránka	37
7.8	Stránka pro zapnutí měření	37
7.9	Hierarchická struktura složek	38

Úvod

Jelikož je přenos přesného času a stabilní frekvence přes optické vlákno relativně novou metodou, je nejprve potřeba zjistit, jaké faktory můžou přenos ovlivnit a jakým způsobem lze tyto následky minimalizovat nebo odstranit. Malou pomoc můžou nabídnout dnes využívané metody přenosu, zvláště pak přenos pomocí satelitní technologie.

Poté je možné přejít k samotnému návrhu přenosu a ověření jeho funkčnosti. Tyto data pak můžou ukázat problémy, které budou při měření hrát určitou roli. Díky tomu bude možné navrhnout vylepšené měření vyhýbající se těmto problémům nebo zkoumat samotné problémy a jejich dopad na přenos.

1 Čas

Sekunda je jednou ze sedmi základních jednotek dnes celosvětově používané soustavy jednotek SI, zároveň se jedná o nejpřesněji dnes změřenou veličinu, jejíž odchylka se blíží k hodnotě 10^{-19} .

I přes to, že jsme schopni pomocí dnešních přístrojů dosáhnout tak nízké odchylky, je Allanova odchylka atomových hodin stanovena standardem *Mezinárodním úřadem pro míry a váhy - Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) na velikost 10^{-15} [5].

1.1 Definice sekundy

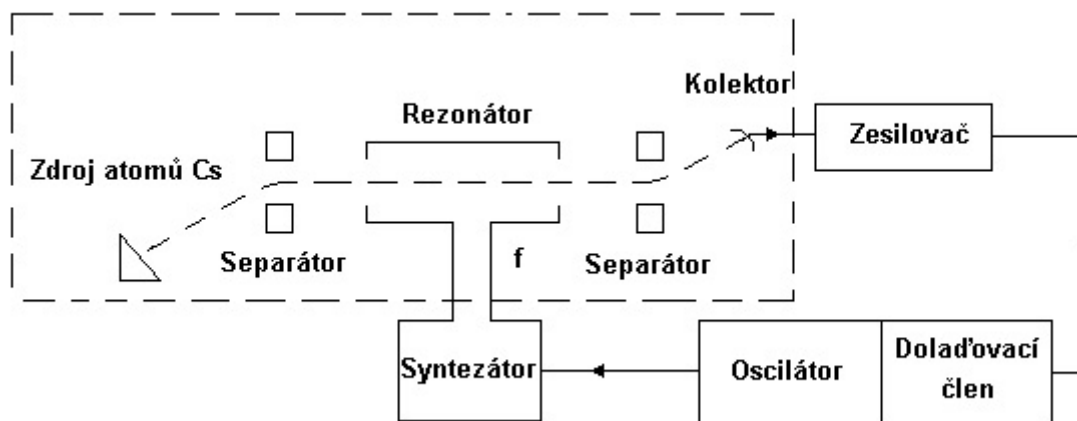
Schválení definice sekundy, jak ji známe v malých změnách dodnes, tedy jako 9 192 631 770 kmitů atomu $^{133}\text{cesia}$, přišlo na 13. zasedání generální konference pro míry a váhy v roce 1967, tím byla nahrazena v té době sedm let platná definice, která sekundu udávala jako $\frac{1}{86400}$ středního Slunečního dne, jenž byla astronomy označena za nepřesnou z důvodu zpomalování se zemské rotace [6][1].

Poslední aktualizace definice sekundy pochází z roku 2011. Její přesné znění se nachází na webových stránkách Českého metrologického institutu, kde je uvedeno následovně:

„Sekunda, symbol s , je jednotkou času; její velikost je určena stanovením číselné hodnoty frekvence hyper-jemného rozštěpení základního stavu atomu $^{133}\text{cesia}$ v klidu a při teplotě 0K tak, aby se rovnala přesně 9 192 631 770, je-li vyjádřena v jednotce soustavy SI s^{-1} , což je rovno Hz “ [5].

1.2 Masery

Aby bylo možné dosáhnout tak vysoké přesnosti atomových hodin, je zapotřebí použít vysoce přesný oscilátor. Ten je v případě záření v mikrovlnné části spektra nazván *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (MASER) čili zesilovač mikrovln stimulovaný emisním zářením. Zjednodušeně řečeno, jedná se v podstatě o sestavu zářiče excitovaných atomů, oddělovacích magnetických cívek, směřující proud excitovaných atomů do rezonanční komory, jejíž frekvence je nastavena na frekvenci mikrovlnného záření vznikajícímu při návratu atomů z excitovaného stavu, a velmi přesného spektrometru, který zaujímá pozici řídicího prvku celé sestavy.



Obr. 1.1: Principiální schéma casiového maseru [1]

1.2.1 Typy maserů

Základní rozdělení maserů se odráží od skupenství látky používající se jako zářič. Z toho pak vychází jejich vlastnosti a následné využití.

V případě plyných maserů je nejznámějším zástupcem maser pracující s atomy cesia. Princip fungování casiového maseru je vidět na obrázku 1.1. Jako zdroj atomů zde slouží odpařovací komora, z které je vyslán proud atomů cesia kolem separačních cívek. Ty pomocí elektromagnetického pole odkloní neexcitované atomy od hlavního proudu vstupujícího do rezonanční komory. Uvnitř komory dochází k návratu atomů do normální energetické hladiny, což je doprovázeno vyzářením mikrovln o přesné vlnové délce. Toto vlnění spouští řetězovou reakci a deexcitaci dalších atomů. Získané mikrovlnné záření je následně odváděno z komory přes zesilovač do řídicí elektroniky, odkud je řízen celý průběh získávání koherentní frekvence. U atomových hodin je tato frekvence zpracovávána frekvenčním čítačem. Ten spolu s pomocnou elektronikou následně vytváří pulzy v přesných vteřinových intervalech [7].

Další typ maserů využívá pevných krystalů, nejčastěji rubidia. Jde o předchůdce laserů, takže princip funkce je velmi podobný, jako u některých dnešních vysokovýkonových laserů. Do rezonanční komory, v které se nachází pevný krystal, je pomocí mikrovlnného zářiče (též nazývaného pumpa) dodávána energie na excitaci atomů.

Velkou výhodou pevných maserů je možnost velké miniaturizace. Ty, na rozdíl od ostatních typů, jenž dosahují rozměrů někdy až jednotek metrů, jsou v dnešní době vyráběny i ve velikostech jednotek milimetrů, což umožňuje masery osazovat na čipy atomových hodin.



Obr. 1.2: Atomové hodiny o velikosti chipu. Rozměry $(4 \times 3,5 \times 1,45)$ cm [2]

1.2.2 Použití maserů

Jelikož jsou masery generátory vysoce přesné referenční frekvence, je jejich nejčastější využití právě v atomových hodinách, jako etalony času. Uplatnění ovšem nacházejí i jako nízkošumové mikrovlnné zesilovače v astronomických radioteleskopech [8].

2 Frekvence

Jelikož pomocí frekvence získáváme základní jednotku času, je přenos této veličiny významnější, než přenos samotného času. Takový přenos ovlivňuje ovšem větší množství vnějších vlivů než při přenosu času, s kterými je nutno se vypořádat.

2.1 Koherentní záření

Koherentní záření, je takové záření, které má v jakémkoliv okamžiku a v jakémkoliv bodě stejnou frekvenci a rozdíl fází se nemění. Takové záření pak v literatuře najdeme jako *komplexní koherentní záření*. Skládá se ze dvou částí, a to z časové koherence a prostorové koherence. Příkladem zdroje koherentního záření je laser.

2.1.1 Časová koherence

Zdroj časově koherentního záření v jakýkoliv okamžik vyzařuje elektromagnetické vlnění o stejné vlnové délce λ . U reálných zdrojů záření dochází ke generování i jiných vlnových délek s vlnovou délkou $\lambda + \Delta\lambda$. Tím bude docházet k interferenci paprsků o různých vlnových délkách a v ose šíření budou vznikat zázněje. Vzdálenost jednotlivých záznějů lze vypočítat jako podíl kvadrátu požadovaného paprsku o vlnové délce λ , rozdílem vlnových délek

$$L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = \frac{c}{\Delta f}$$

Zlepšením monochromatickosti se sníží vyzářená energie na ostatních vlnových délkách než na těch, které jsou žádané [9].

2.1.2 Prostorová koherence

Prostorovou koherenci lze také vyjádřit jako koherentní šířku. To je vzdálenost na stínítku mezi první destruktivní interferencí (tam kde se vlnový posuv vyzářených dvou paprsků z opačných konců vyzařovací monochromatické plochy rovná $\lambda/2$) a osou šíření svazku paprsků. Značíme ji velké R a lze ji vyjádřit vztahem

$$R = a \frac{\lambda}{4r}$$

Kde a je vzdálenost zdroje záření od stínítka, λ je vlnová délka vyzařovaného světla a r se rovná poloměru vyzařovací plochy zdroje [9].

2.1.3 Koherenční délka

Délka koherence je parametr udávající největší dráhový rozdíl, při kterém je světlo daného zdroje ještě schopné interference. Je definována pomocí rychlosti světla a času koherence. Tohoto jevu se využívá při přenosu frekvence přes optické vlákno. Kdy je vysílané a přijaté světlo svedeno do interferometru, zde proběhne interference obou frekvencí a z velikosti interference se vypočítá aktuální délka optické trasy.

Pokud tedy vezmeme laser s vlnovou délkou 1550 nm a požadovaná koherenční délka má být 1 km, pak dosazením do vzorce

$$\Delta v = \frac{\frac{c}{n}}{\pi \cdot L_{coh}}$$

kde c je rychlost světla ve vakuu, n je index lomu optického vlákna a L_{coh} je požadovaná koherenční délka, získáme vyzařovací šířku pásma $\Delta v = 65,925 kHz$.

Některé typy pevných laserů jsou schopny dosáhnout koherenční délky o velikosti až 10 km, což odpovídá šířce pásma jdoucí se pod 1 kHz. Polovodičové lasery mají šířku pásma podstatně menší, například pro běžný laser s Cauchy-Lorentzovým rozdělením a středem v 1550 nm je vyzařovaná šířka pásma $\Delta v \approx 9,42 MHz$ [10].

2.1.4 Lasery

Jak již samotná zkratka LASER napovídá, z počátku byly lasery nazývány optickými masery, i přes návrh samotného C. H. Townese změnit slovo *Microwave* ve zkratce MASER na *Molecular* se však místo toho v běžné praxi ujal název G. Goulda, který slovo *Microwave* nahradil slovem *Light* [7].

Rozdělení laserů je stejné jako u maserů, až na jednu výjimku, a to jsou polovodičové lasery. Ty jako jediné pro přechod částic do excitovaného stavu nevyužívají optickou pumpu, nýbrž elektrický proud a jsou konstruovány odlišným způsobem, kvůli tomu tvoří samostatnou skupinu.

Druhy laserů

Plynné lasery dosahují vysoké koherence záření, jak v pulzním režimu, tak i v kontinuálním, takže jejich největší uplatnění se nachází v oblasti vědy. V praxi se příliš nevyskytují, jelikož mají nízký výkon v řádech miliwattů až wattů. Je zde ovšem výjimka, a to CO₂ laser, jehož výkon dosahuje až jednotek kW. Kvůli tomuto výkonu se využívá k průmyslovému řezání.

Hlavní nevýhodou plyných laserů jsou jejich velké rozměry, kde aktivní komora těchto laserů dosahuje délky i několika metrů, čímž je jejich použití v běžné praxi značně omezené.

Kapalné lasery, někdy také nazývané jako *barevné lasery*, využívají ve svých rezonančních komorách hlavně roztoky organických sloučenin umožňující práci v širokém spektru frekvencí sahající od infračervené po ultrafialovou oblast.

Jejich vysoká účinnost, přesnost svazku a koherence je velmi vhodná pro využití ve vědě nebo lékařském a spektroskopickém výzkumu. Navíc jejich širokopásmové emise je činí velmi vhodnými pro generování ultrakrátkých pulzů [11].

Jak již bylo zmíněno výše, pevné lasery se dělí na dva typy a to podle způsobu dodávání energie do aktivní oblasti a jejich konstrukce. Z běžných pevných laserů můžeme jako zástupce uvést rubidiový laser, jehož obrovská výhoda spočívá v uložení velkého množství energie, kterou je poté možné vyzářit za velmi krátký okamžik. Například krystal o délce 10 cm je schopen uložit energii 17 J [11].

Polovodičové lasery

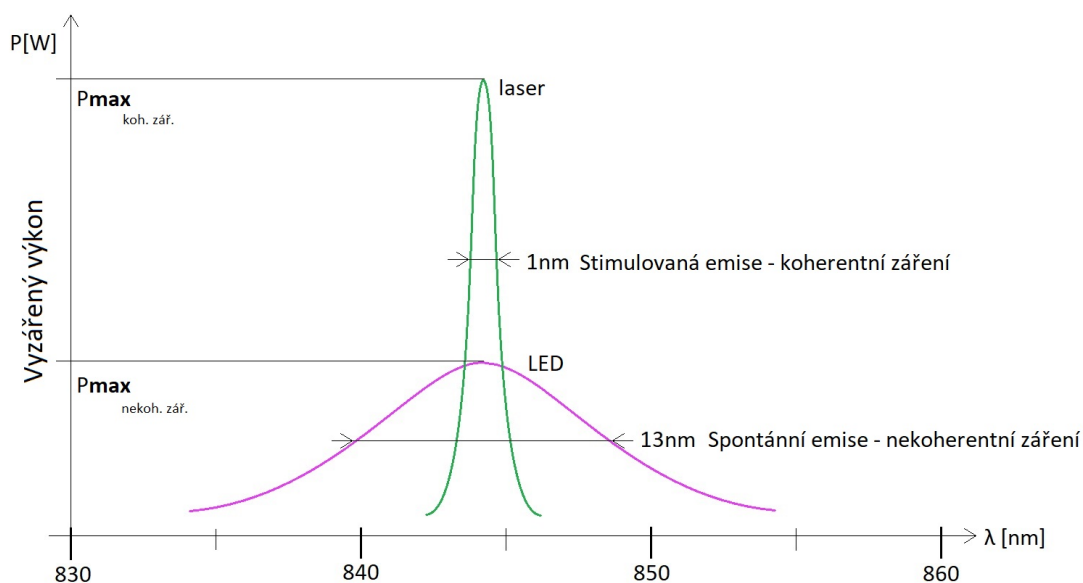
Emise světelného záření u těchto laserů nastává na PN přechodu při rekombinaci, tedy při přechodu elektronu z vodivostního pásu polovodiče do pásu valenčního. Podle velikosti rozdílu mezi těmito dvěma stavy je vyzářen foton o určité vlnové délce. Fotony jsou vyzařovány všemi směry, některé ji mohou opět předat elektronům ve valenčním pásu a vytvořit tak nový pár elektron-díra, ostatní fotony jsou vyzářeny.

Rezonanční komoru těchto laserů tvoří samotný PN přechod polovodičové struktury, ten je na opačných stranách, vzhledem k natočení krystalové mřížky, správně odštípnut. Před vynalezením této techniky byl uříznut a následně vyleštěn. Tím vznikne *Fabryho-Périotova rezonanční komora*, která využívá zákonu odrazu světla na rozhraní dvou materiálů, v našem případě polovodiče a vzduchu [12].

V telekomunikacích se dnes nejčastěji využívají tzv. *Distributed Feedback Laser* (DFB), neboli lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou. Jejich rezonanční komora je tvořena mřížkou s *braggovým rozptylem* vyleptanou přímo v polovodiči, což je v podstatě soustava polopropustných zrcadel, na nichž dochází ke konstruktivním a destruktivním odrazům. Výsledkem použití této struktury je velmi úzká spektrální šířka těchto laserů, která je menší jak 1nm[3].

Polovodičové lasery mohou být provozovány, jak v *Quick switching* (Q-switching), tak *Continuous Wave* (CW). Při CW režimu je ovšem potřeba zajistit dobré chlazení, jelikož hrozí jeho vysoké zahřátí, jenž vede k nárůstu proudu laserem a při pokračování tohoto trendu může dojít až ke zničení laseru. Zahřívání s sebou přináší i další negativní účinky na parametry laseru, jako jsou posun vyzařované vlnové délky nebo větší uplatnění spontánní emise (klesá vyzařovací výkon laseru).

U Q-switching režimu je podstatným parametrem *rezonanční relaxační frekvence*. Tento parametr je velmi důležitý při použití v telekomunikacích, jelikož jde o maxi-



Obr. 2.1: Porovnání šířky pásma emitovaného záření při spontánní a stimulované emisi. Převzato z [3].

mální frekvenci, do které je možno laser modulovat. Výpočet této frekvence je možný při použití vztahu:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{vG'_0P_0}{\tau_p}}$$

Kde v je rychlost světla v aktivní oblasti, G_0 je diferenciální zisk, P_0 je hustota fotonů a τ_p je doba života fotonu. Taktéž je možné tuto hodnotu získat ze vztahu:

$$f_r \approx \sqrt{I - I_{th}}$$

Kde I je protékající proud laserem a I_{th} je prahový proud laseru.

U dnešních polovodičových laserů se rezonanční relaxační frekvence pohybuje kolem $10^{10} Hz$ [13].

3 Způsoby přenosu času a frekvence

Většina dnešních elektronických zařízení, ať už se jedná o ledničku nebo o vysoce specifické vědecké přístroje, umožňuje nastavení, případně synchronizaci jejich vnitřních hodin. Tato synchronizace může probíhat rozličnými způsoby přes různá přenosová média. Kombinace způsobů přenosu a druhu přenosového media ovšem ovlivní přesnost a vzdálenost možného přenosu.

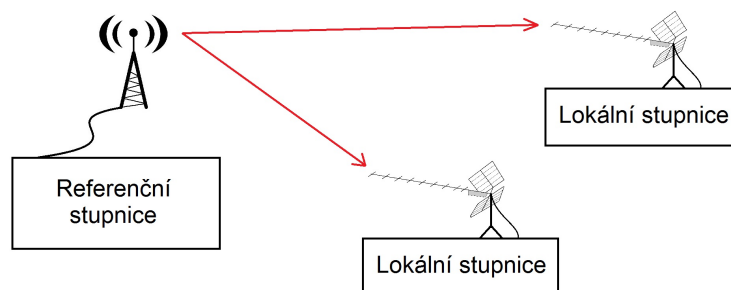
3.1 Metody přenosu

Různé metody přenosu lze uplatnit pro různá řešení, od přenosu synchronizační informace pro *Mezinárodní atomový čas - International Atomic Time (TAI)*, až po synchronizaci hodin v *internetu věcí*.

3.1.1 One-way

Jednosměrný přenos je nejjednodušší metodou, kterou se přenáší čas, případně frekvence. Pomocí reference umístěné na straně vysílače se periodicky (nejčastěji každou sekundu) odesílá synchronizační informace. Ta může nabývat různých podob, od prostého pulzu, po komplexní paket s časovou známkou. Na straně příjemců tak proběhne vynulování odchylky časové stupnice od referenční stupnice. Princip přenosu je ukázán na obrázku 3.1.

Jde o nejvyužívanější způsob přenosu u rádiových signálů, které využívají pozemní vysílače času, například DCF77 nebo satelitní systémy typu GPS, GLONASS. Při tomto přenosu je nutné kompenzovat zpoždění způsobené přenosem, jelikož na straně příjemce zvětšuje offset lokální stupnice. U vícekanálové *Global positioning system* (GPS) lze pro dopočítání zpoždění využít rozdíl rychlosti šíření dvou různých frekvencí [14].

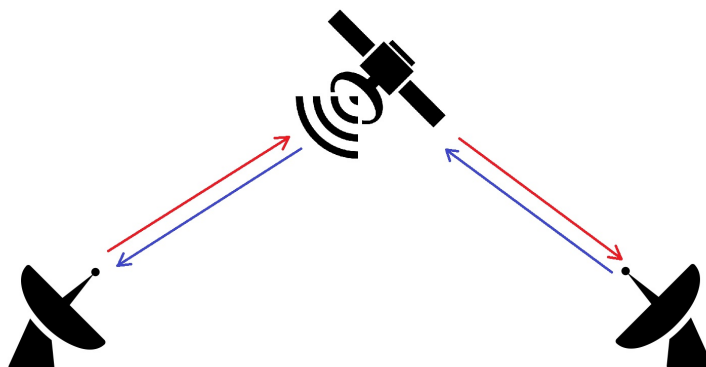


Obr. 3.1: Jednosměrný přenos

3.1.2 Two-way

Aby bylo možné využívat tuto metodu, je zapotřebí, aby obě stanice, mezi kterými synchronizace probíhá, byly schopny, jak přijímat, tak odesílat synchronizační zprávy. Taktéž velmi podstatným požadavkem je, aby zpoždění při přenosu bylo stejně velké pro oba směry. Jakákoliv nesymetrie způsobí, že rozdíl obou přenosů je započínán jako korekce času.

Naopak výhodou tohoto režimu spočívá v tom, že pokud je zpoždění oběma směry symetrické, tak v ideálním případě velikost zpoždění žádným způsobem neovlivňuje přesnost. Dosáhnout takových parametrů bohužel není v praxi možné, proto se některé protokoly pro přenos času snaží tento problém eliminovat jiným způsobem. Například nejrozšířenější protokol pro přenos času pomocí sítě *Internet Network Time Protocol* (NTP) řeší tento problém tím, že servery poskytující přesný čas se nachází co nejbližší klientské stanici, tím pádem je chyba způsobená rozdílnou dobou přenosu zmenšena na minimum. I přes to není schopen tento protokol dosáhnout přesnosti lepší než 10 ms [15].



Obr. 3.2: Obousměrný přenos

Nejvyšší přesnosti je dosaženo pomocí satelitů a to díky tomu, že se jako v předchozích případech nevyužívá složitá infrastruktura, ale přenos se ve většině případů provádí pouze přes jeden prvek. Tím pádem je mnohem přesnější než předcházející systém. Jeho výhodou není pouze vysoká přesnost přenosu, ale i možnost dosáhnout takové přesnosti na velmi velké vzdálenosti v řádu tisíců kilometrů, viz. obrázek 3.2 [15].

3.1.3 Common view

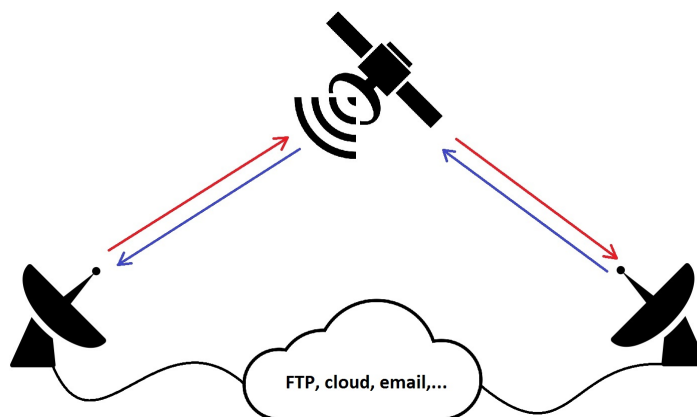
Lze do češtiny přeložit jako jednosměrný přenos se společným posouzením. Jedná se o rozšíření *One-way* přenosu, dosahující vyšší přesnosti a to za pomoci výměny

informací o zpoždění od jednotlivých referencí.

Na začátku tedy proběhne synchronizace všech lokálních stanic metodou *One-way* s jednou nebo více referenčních stanic, nejčastěji se jedná o satelity *Globální družicový polohový systém - Global Navigation Satellite System* (GNSS), a uloží si jednotlivé doby zpoždění pro každý satelit. Poté si informace o zpoždění z jednotlivých referencí lokální stanice navzájem přepošlou přes běžné komunikační kanály. Speciálními algoritmy poté každá stanice dopočítá chyby, které mohly nastat při přenosu a tím zvýší přesnost synchronizace. Tento postup je ukázána na obrázku 3.3 [14].

Velkou výhodou této metody je, že zpoždění pro jednotlivé lokální stanice může být různé a i přesto je pomocí této metody dosahováno vysoké přesnosti. Navíc při použití satelitních systémů je umožněna synchronizace času na velké vzdálenosti. Z pohledu přesnosti je ovšem lepší, aby lokální stanice byly blíže u sebe a tím se kompenzovali odchylky zpoždění způsobené atmosférou a ionosférou v různých místech planety.

Jako důkaz přesnosti této metody lze uvést, že tuto metodu přenosu dnes využívá k synchronizace více jak 200 atomových hodin, které se podílejí na vytváření nejpřesnější časové reference světa TAI [16].



Obr. 3.3: Common view

3.2 Typy přenosu

Možnost přenosu času a frekvence není vázána pouze na optická vlákna nebo satelity, hojně využívané jsou také přenosy po ethernetu nebo rádiovými vlnami, ovšem jejich nevýhodou je nižší přesnost, která není příliš vhodná pro vědecké účely, zatímco potřebám běžných spotřebičů bohatě dostačuje.

3.2.1 Radiové síť

Známým evropským vysílačem normálové frekvence a časového signálu je německá stanice DCF77. Nachází se asi 25 km jihovýchodně od Frankfurtu nad Mohanem. Stanice začala vysílat v roce 1959 a v roce 1973 byla přidána i časová informace. Vysílaná nosná frekvence je 77,5 kHz, získávána je z atomových hodin institutu *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB). Časová informace je kromě vteřiny vysílána každou minutu a obsahuje aktuální minutu, hodinu, den, den v týdnu, měsíc a rok, které jsou kódovány BCD kódem. Udávaný dosah této stanice je 2000 km. Dříve byl hojně využíván k časové synchronizaci téměř veškerých zařízení. Dnes jej využívají hlavně běžní obyvatelé k synchronizaci rádiem řízených spotřebičů [17].

Další celosvětově známou, ale již dosluhující rádiovou sítí poskytující vysoce přesnou frekvenci je LORAN neboli Long Range Navigation. Byl vyvinut během druhé světové války a byl využíván pro navigaci námořní a letecké dopravy, dnes slouží jako záloha navigačního systému GNSS [14].

3.2.2 Satelitní síť

Přesto, že jsou satelity systémů GNSS běžně využívány k určování polohy, je možné je použít i pro přenos času a frekvence, a to díky jejich vysoce přesné časové stupnici. Tu zajišťují tři nebo čtyři na palubě umístěné atomové hodiny cesiového a rubidiového typu generující frekvenci 10,23 MHz. Vzhledem k umístění satelitů na *Medium Earth Orbit* (MEO), tedy 20 350 km vysoko, kde je přenos ovlivněn nejen samotnou dobou přenosu (přibližně 65 ms), ale i ionosférou, se pro přenos času i frekvence využívá metoda *common view*, která byla pro satelity plošně zaváděna v devadesátých letech minulého století. Díky tomu mohl být v roce 1994 zaveden standart *Common GNSS Generic Time Transfer Standard* (CGGTTS) pro určování TAI [16].

3.2.3 Počítačové síť

Dnes nejvyužívanější způsob synchronizace času se uskuteční pomocí sítě internet, případně sítě *Local Area Network* (LAN). Zde je pro běžné využití používá Network Time Protocol (NTP), případně jeho zjednodušená podoba *Simple Network Time Protokol* (SNTP). Tyto protokoly dosahují nejistoty v řádu milisekund, v lokální síti maximálně až stovek mikrosekund.

Princip přenosu funguje tak, že se od tří a více serverů přenesou časová informace, záznamy s odchylkou větší jak jedna sekunda jsou zahozeny a ze zbylých informací se vybere ten s největším počtem průniků.

Pro přesnější synchronizaci například u průmyslového Ethernetu je vhodnější využití protokolu *Precision Time Protocol* (PTP) později standardizovaného jako *IEEE 61588*. Jeho odchylka je menší než $1\ \mu\text{s}$, pracuje však pouze v rámci domény. Způsob synchronizace funguje na principu master-slave, kdy master nejdříve pošle slave stanici časovou hodnotu a buď přímo v této zprávě, nebo následně na žádost slave stanice odešle informaci o zpoždění při přenosu, díky kterému je schopna slave stanice zmenšit odchylku své časové stupnice [18].

4 Přenos po optických vláknech

Vysoce kvalitní optická vlákna a stabilní lasery jsou v posledních letech hojně nasazovány po celém světě. Umožňují přenos velmi vysokými rychlostmi na dlouhé vzdálenosti, proto se stávají v oblasti přenosu přesného času a stabilní frekvence velkým konkurentem satelitní technologie. Jejich potenciál do budoucna je hlavně v aktuálním vývoji optických hodin, které dosahují mnohem vyšší přesnosti a bude je možné připojit přímo na optická vlákna.

4.1 Využití stávající sítě

Možnost vybudovat samostatnou optickou přenosovou síť, pro přenos času a frekvence je z praktického hlediska zcela nesmyslná a nereálná z mnoha zřejmých důvodů. Jelikož je ovšem většina optických tras stavěna pro komerční využití, nastává otázka jakým způsobem zakomponovat přenos času a frekvence do již fungující sítě.

4.1.1 Temná vlákna

Při výstavbě páteřních optických tras se zcela běžně počítá s jejich budoucí rozšiřitelností. Proto se na těchto trasách vyskytují temná vlákna, někdy také nazývaná černá vlákna. Jde o vlákna, v nichž není žádný provoz a slouží jako záloha systému. Výhodou využití těchto vláken je, že se může využít jakákoliv vlnová délka, což je zvláště vhodné u optických hodin, které nevyužívají běžné telekomunikační lasery [19].

4.1.2 Vlnový multiplex

Jelikož je nevyužití celého spektra plýtváním přenosových kapacit, bylo zavedeno rozdělení spektra do kanálů, kde každý využívá přesně dané frekvenční pásmo. Standard ITU-T rozlišuje hrubý vlnový multiplex (CWDM ITU-T G.695), ten má dělení kanálů po 20 nm a první kanál se nachází na 1260 nm, a hustý vlnový multiplex (DWDM ITU-T G.694.1). Na něj se v dnešní době přechází. Jeho rozložení kanálů umožňuje v jednom kanálu CWDM mít až šestnáct kanálů DWDM. Nevýhodou tohoto řešení je, při použití levnějších zařízení, zde může nastat interference mezi jednotlivými kanály, ta pak ovlivňuje přenos v okolních kanálech. Zvláště citlivý na toto rušení je přenos frekvence [20].

4.1.3 Sdílení kapacity

Jelikož se hlavně u přenosu času synchronizační informace nepotřebuje posílat kontinuálně, je možné maximalizovat využití vlákna zasíláním běžných datových zpráv v mezerách mezi synchronizačními informacemi. Pokud je tedy synchronizační informace posílána jednou za sekundu, je nutné zajistit aby v tomto čase bylo vlákno nebo kanál volný a tím nebyl ovlivněn přenos informace. Existuje i možnost posílat synchronizační informace spolu s daty pomocí piggy backingu. U tohoto přenosu je důležité, aby byl zajištěn kontinuální tok dat oběma směry. Tento princip byl otestován při přenosu času na 10 Gb/s lince v módu dvoucestného přenosu [19].

4.2 Přenos času

Stejně jako u ostatních přenosových médií se i v případě optických vláken setkáme se dvěma typy přenosu času. Dvoucestný přenos, který vyžaduje, aby obě stanice byly schopné přijímat i vysílat časovou informaci, využívají ho hlavně státní instituce uchovávající etalony času, výzkumné laboratoře, ale případně i astronomické observatoře nebo další subjekty vyžadující vysoce přesný čas.

Princip fungování je pořád stejný, kdy každá stanice vlastní měřič časových intervalů, který spouští místní hodiny a zastavují hodiny vzdálené stanice. Od takto naměřeného času jsou odečteny zpoždění způsobené přenosem informace přes síť, zpracováním informace a další. Zbýlý rozdíl slouží k samotné korekci časové stupnice.

Jednocestný přenos je používán pro synchronizaci hodin, u kterých není vyžadována nejvyšší možná dosažitelná přesnost, to mohou být například servery poskytující synchronizaci času běžným zařízením v síti Internet nebo mobilních sítích. Zde se například využívá principu využití dvou laserů o různých vlnových délkách.

Časová informace je posílána ve stejnou chvíli oběma lasery přes jedno optické vlákno. Jelikož se každá vlnová délka šíří ve vlákne různou rychlostí, informace odeslaná ve stejnou chvíli dorazí pro každou vlnovou délku s jiným zpožděním. Tento efekt je též nazýván jako skupinové zpoždění a je závislý na délce vlákna, indexu lomu a teplotě vlákna, která oba předchozí parametry ovlivňuje. Rozdíl ve zpoždění pak slouží jako další proměnná při korekcích zpoždění a zpřesnění přenášené veličiny [19].

4.3 Přenos frekvence

Při přenosu frekvence po optickém vlákne může být laser využit, buď jako nosná, na kterou je modulována velmi přesná mikrovlnná frekvence, nebo častěji, je využito

velmi stabilního laseru s co nejmenší spektrální šířkou. V tom případě se využívá frekvence vlnění samotného laseru. Ta se, v závislosti na použitém laseru, pohybuje v rozmezí přibližně 190 THz - 390 THz, to odpovídá vlnovým délkám cca od 1310 nm do 1550 nm.

I pro přenos frekvence je možné využít jednosměrný, či obousměrný přenos. Zde mají koncové stanice místo čítače frekvenční analyzátor. Přijatá frekvence projde úpravou v analyticko-řídícím modulu, jenž z ní vyfiltruje parazitní frekvence přidané přenosovou trasou. Následným porovnáním přijaté a lokální frekvence dochází k synchronizaci lokální frekvenční stupnice.

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB/km]
770-920	3,5-2,5
1270-1370	0,35-0,50
All waves 1370-1530	0,34-0,19
1530-1565	0,19-0,22
1565-1625	0,22

Tab. 5.1: Tabulka využívaných vlnových délek a jejich útlumů v optickém vlákne [22] [23].

5 Stabilita optické trasy

Využívání velmi vysokým frekvencí klade velké nároky na co největší stabilitu po celé délce optické trasy. Zatímco přenos času je ovlivněn hlavně rozdílným zpožděním v jednotlivých směrech šíření a jittrem, frekvence je naopak velmi citlivá na útlum a disperzi. Tyto parametry ovlivňuje velké množství faktorů, jenž každý z nich působí rozdílně a existují rozdílné způsoby jejich minimalizace.

5.1 Útlum vlákna

Útlum optických vláken lze rozdělit do tří podkategorií podle toho, jaké vlivy útlum způsobí. Jedná se o absorpci, rozptyl a vyzáření, přičemž poslední jmenovaná je způsobena nedokonalostí odrazu na rozhraní dvou prostředí nebo také ohybem vlákna nad úhel odrazu, což způsobí úplné vyzáření paprsku z vlákna [21].

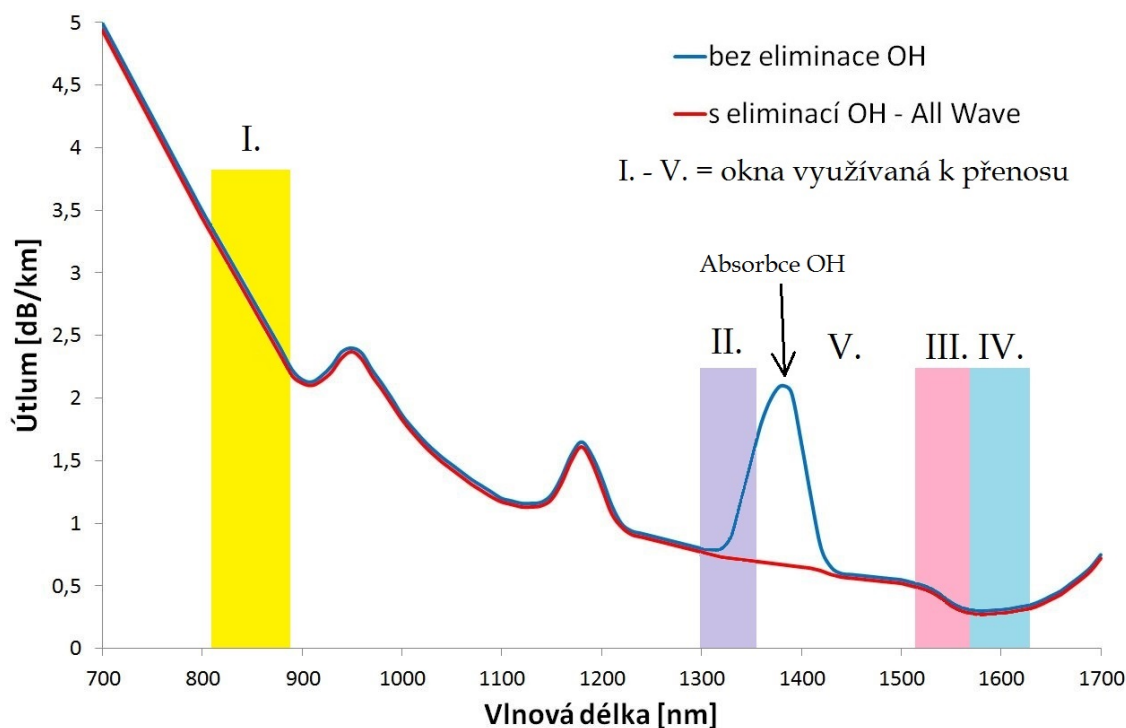
5.1.1 Absorbce

Hlavní složkou absorpce v optickém vlákne způsobují tepelné ztráty rezonančním kmitočtem OH iontů. Ty nezasahují do využívané vlnové délky přímo, ale druhou harmonickou 1380 nm a třetí harmonickou 940 nm. Tento jev je vidět na grafu měrného útlumu obrázek 5.1.

Další ztráty způsobují přechody v atomární případně molekulární struktuře základního materiálu a příměsí, obzvláště pak ionty železa, mědi a chromu [21].

5.1.2 Rozptyl

Rozptyl paprsku způsobují nehomogenity ve vlákne. Ty dělíme podle velikosti na mikroskopické a makroskopické. Mikroskopické nehomogenity jsou zapříčiněny příměsí v materiálu jádru vlákna a náhodným rozložením molekul v amorfním materiálu. Tomuto druhu říkáme také *Rayleighův rozptyl*.



Obr. 5.1: Měrný útlum optického vlákna

Do makroskopických rozptylů řadíme rozptyly způsobené bublinkami případně makroskopickými nečistotami (prachové částice,...) nebo nehomogenity šířky jádra, porušení tvarů a rozměrů hranice mezi jádrem a pláštěm, případně poruchy přímocnosti osy světlovodu [21].

5.2 Disperze

Rychlost paprsku v prostředí, kterým prochází je určena indexem lomu prostředí, v případě optického vlákna lze považovat za konstantní po celé jeho délce, a kmitočtu záření. Z toho vyplývá, že paprsky o různých vlnových délkách se v optickém vlákne budou pohybovat rozdílnou rychlostí, takže na konci vlákna bude mít každá vlnová délka rozdílné zpoždění, tím pádem dojde k zvětšení šířky pulzu.

Jelikož je disperze závislá na mnoha faktorech od frekvence záření, spektrální šířky vyzařovaného světla, počtu vidů, až po různé nelinearity při optickém přenosu. Proto „*Disperze vln v optických vláknech je hlavní příčinou zkreslení přenášeného signálu...*“ (Filka, 2017, s.17) [21].

5.2.1 Chromatická disperze

Skládá se z materiálové disperze, tedy rozptylu při lomu světla na rozhraní dvou druhů materiálů, a vlnové disperze, což je zvětšení spektrální šířky vidu. Tato disperze se projevuje hlavně u jednovlňových vláken využívajících *Wavelength Division Multiplexing* (WDM), kde na konci vlákna dojde k rozšíření pulzu v čase a může docházet k interferenci mezi jednotlivými přenášenými bity. [21]

5.3 Teplota vlákna

Pro omezení chybovosti při přenosu signálu přes optické vlákno je také důležitá optimální teplota vlákna a to jak její velikost, tak proměnlivost po celé délce trasy. Při zahřátí vlákna na teploty nad 70 °C dochází k nárůstu útlumu vlákna, stejný efekt nastává při teplotách nižších jak -30 °C, což zhoršuje parametry přenosu. U frekvence je podstatnější disperze způsobená rozdílnou teplotou v různých částech vlákna, ta způsobuje změnu indexu lomu a tím rozdílnou disperzi, také se zvětšuje disperze díky srážkám fotonů s kmitajícími atomy, která posunuje vlnovou délku k vyšším hodnotám [21].

5.4 Zpoždění vlákna

Jelikož je rychlost světla konečná, dochází při přenosu po optickém vlákně také k časovému zpoždění. Toto zpoždění je závislé na indexu lomu světla a délkou optické trasy. Podle Dr. Rüdiger Paschotta [24] je index lomu jádra běžného optického vlákna na vlnové délce 1550 nm přibližně $n \approx 1,4475$. Tato hodnota se ovšem mění například na konektorech nebo na poruchách vlákna a to se poté projeví na samotném zpoždění.

6 Návrh měření času a frekvence

Pro přenos času se použije adaptér sdružení CESNET, který byl navržen a vyroben ve spolupráci s *Ústavem fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR* (ÚFE) k experimentálnímu přenosu času mezi ÚFE se sídlem v Praze a *Bundesamt für Eich - und Vermessungswesen* (BEV) ve Vídni, pomocí dvoucestného přenosu. V tomto návrhu byl použit pouze jeden adaptér, kde bylo vysílání a příjem spojen optickou trasou o známých parametrech.

K přenosu frekvence bude zkonstruován adaptér s vysoce koherentním laserem. Pro odečtení posuvu vlnové frekvence a změny šířky pásma bude nutné převést světelný paprsek na napětí, které bude čteno analogovým osciloskopem.

6.1 Přenos času

Signál generovaný oscilátorem je v modulátoru modulován pomocí frekvence 1 *Puls per Second* (PPS). Signálem 1 PPS jsou zároveň aktivovány čítače TIC Tx a TIC Rx (Time Interval Counter). Při výstupu signálu z modulátoru, modulátor zastaví TIC Tx a tento čas je poslán ke zpracování mikropočítači. Signál je následně pomocí SFP transceiveru odeslán přes optické vlákno. Příjmem signálu na Rx demodulátoru zastaví TIC Rx. Od času TIC Rx mikropočítač následně odečte čas získaný počítačem TIC Tx. Výsledná hodnota rovnající se celkovému zpoždění od vyslání po příjem je spolu s časovou známkou uložena do souboru, nebo je možné si ji nechat zobrazit na monitoru spolu s dalšími informacemi.

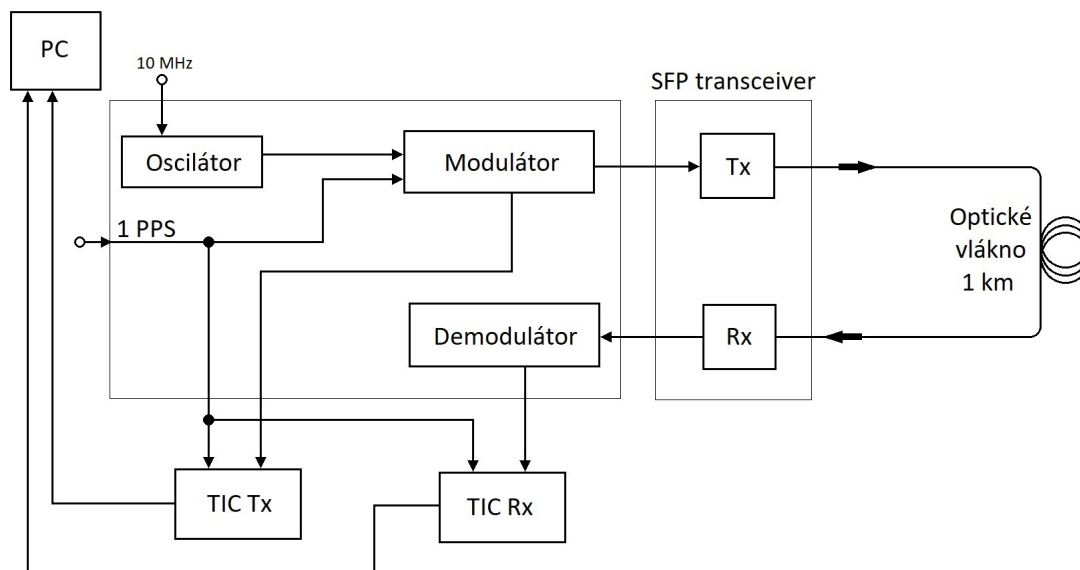
6.1.1 Adaptér pro přenos času

Skládá se z ovládacího mikro-počítače, na kterém běží linuxový operační systém Debian 6 squeeze, jedná se o hlavní řídicí jednotku celého systému, dále krystalu pro získávání přesného 1 PPS a oscilátoru produkujícího přesnou frekvenci. Ten generuje signál o frekvenci 250 MHz nebo je možné jej zamknout na 10 MHz. K modulaci/demodulaci vysílaného signálu je zařízení osazeno *Field Programmable Gate Array* (FPGA) - programovatelným hradlovým polem s čipem Virtex 5 od firmy Xilinx a pro vysílání a příjem optického signálu slouží jednovidový *Small Form-factor Pluggable* (SFP) transceiver pracující na vlnové délce 1550 nm v obou směrech [4].

6.1.2 Ověřovací měření času

K zařízení pro přenos času bude připojeno jednovidové optické vlákno o délce 1000 metrů. Délka propojovacího kabelu pro připojení trasy je 1,5 metru. Jelikož se jedná

pouze o ověřovací měření funkčnosti návrhu přenosu přesného času, bude měření probíhat po dobu dvou minut. Celkové schéma zapojení pro jednosměrný přenos času pomocí optického vlákna lze vidět na obrázku 6.1.



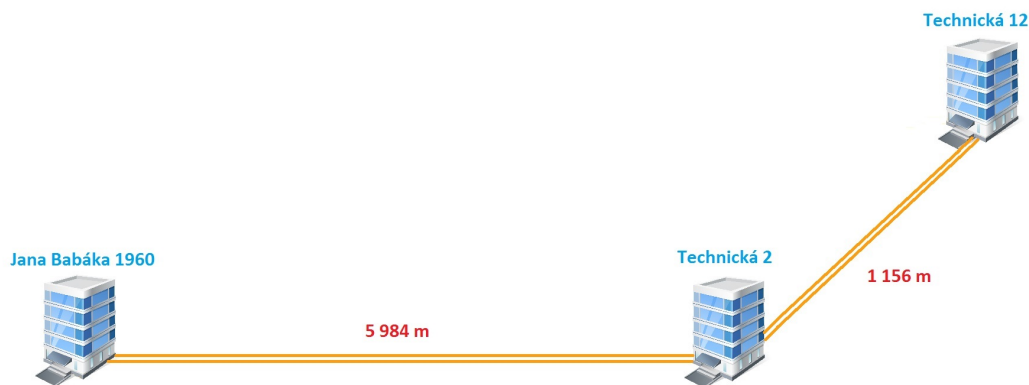
Obr. 6.1: Schéma zapojení přenosu času. Část schéma převzata z [4].

6.1.3 Návrh měření času

Měření času proběhne na trase mezi budovou VUT na Technické 12 a budovou na ulici Jana Babáka. V této budově je vytvořena smyčka a druhým vláknem je signál poslán zpět. Délka celkové trasy je 14280 metrů a po celé délce je vlákno uloženo v zemi. Měřená trasa je znázorněna na obrázku 6.1. Měření bude probíhat po celý týden. Hodnoty měření budou odečítány každou vteřinu.

6.2 Přenos frekvence

Pomocí vysoce stabilní laserové diody je generováno vysoce koherentní záření. Světelný paprsek bude přiveden k rozdělovači, kde bude rozdělen do dvou tras. První trasa dlouhá několik metrů je umístěna v kontrolovaném prostředí a poslouží jako referenční zdroj pro fotodetektor. Druhá trasa je měřená, na ní bude prováděno měření přenosu frekvence a bude ovlivňována vnějšími faktory. Obě trasy jsou opět přivedeny ke slučovači, jenž je připojen na fotodetektor. Ten provede překonvertování na



Obr. 6.2: Schématický nákres trasy pro měření přenosu času

elektrický signál. Jeho zpracování provede signálový analyzátor, který zobrazí posun frekvencí.

6.2.1 Zařízení pro přenos frekvence

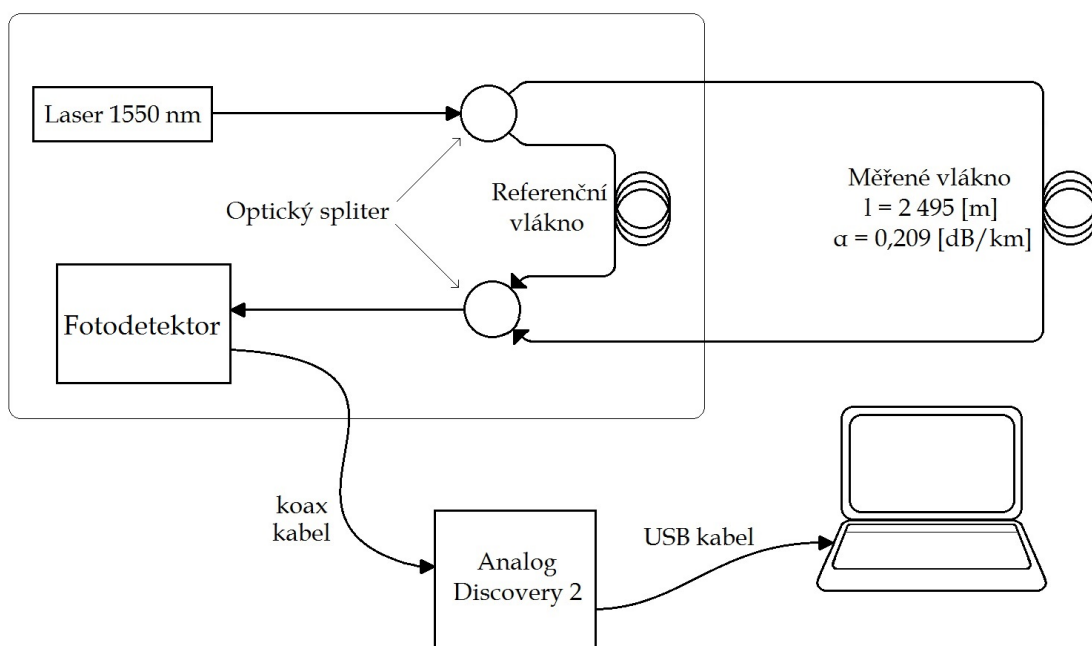
Zařízení je vybaveno vysoce koherentním laserem pracujícím na 1550 nm se spektrální šířkou 1 kHz. Součástí tohoto zařízení jsou též dva optické splityry pro rozdělení a sloučení paprsku. Dále je zařízení vybaveno vysoce výkonným fotodetektorem, který transformuje optický signál na napětí. Pro analýzu napětí fotodetektoru je využit USB analogový osciloskop Analog Discovery 2 od firmy Digilent, který je ovládaný softwarem WaveForms od stejné firmy.

6.2.2 Ověřovací měření frekvence

Zařízení bude připojeno k cívce optického vlákna o délce 2 495 metrů s útlumem 0,209 dB/km. Do trasy bude připojen útlumový člen o velikosti 10 dB. Po zapnutí přístroje se nechá trasa ustálit, po ustálení započne měření, jehož výstupem bude spektrální graf posunu přijímané frekvence získaného pomocí *Rychlá Fourierova Transformace* (FFT). Schématické zapojení je na obrázku 6.3.

6.2.3 Návrh měření frekvence

K měření se využije stejné schéma zapojení jako u ověřovacího měření. Jelikož je frekvence na přenos mnohem citlivější než čas, budou se zkoumat změna šířky spektrální čáry a posun frekvence oproti referenční frekvenci při působení otřesů, zvuků, světla a tepla.

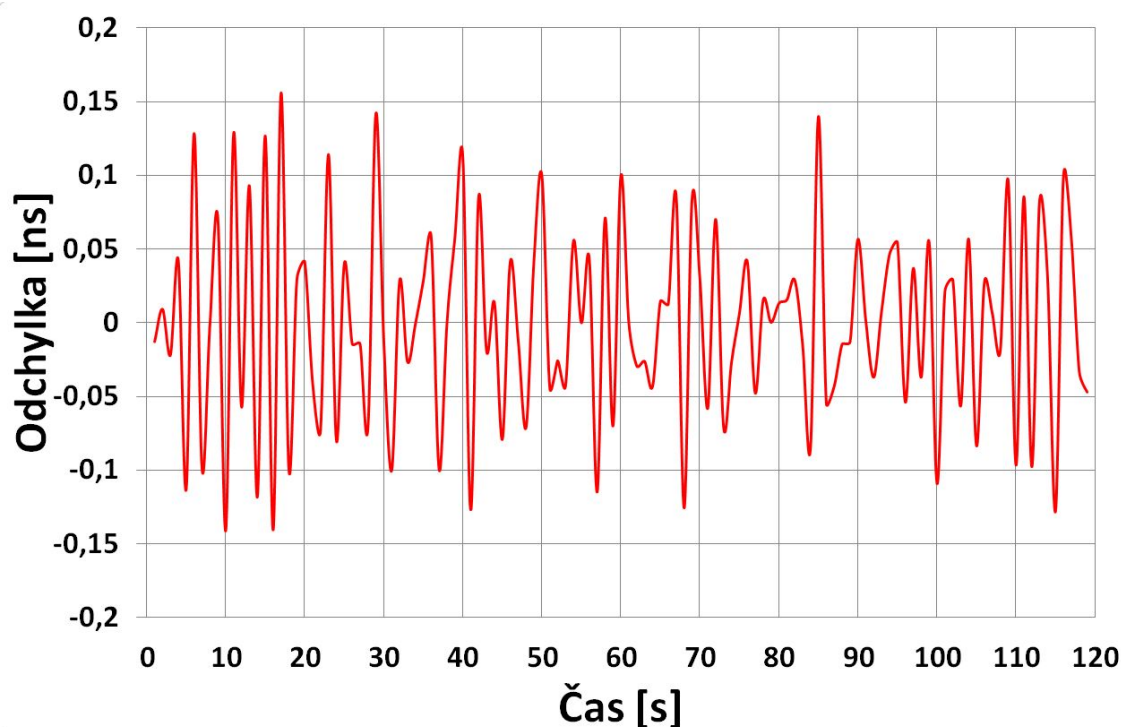


Obr. 6.3: Schématický nákres trasy pro měření přenosu frekvence

7 Výsledky měření

7.1 Ověřovací měření času

Ověřovací měření potvrdilo funkčnost navrhnutého měření. Při měření se zpoždění pohybovalo přibližně v rozmezí $t_{min} = 5288,45$ ns až $t_{max} = 5288,65$ ns. Z grafu 7.1 ověřovacího měření času je vidět, že odchylka mezi po sobě jdoucími hodnotami nepřekročila 300 ps, přičemž průměrná odchylka byla 39 ps.



Obr. 7.1: Schématický náčrt trasy pro měření přenosu frekvence

7.2 Měření času

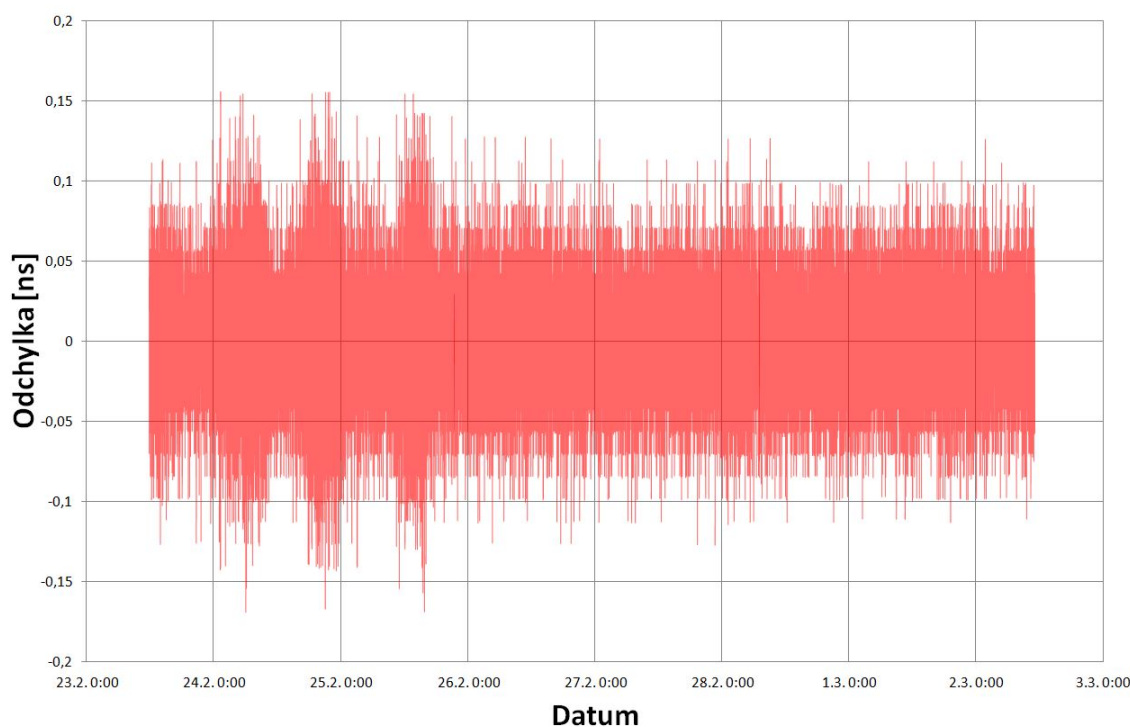
Laser použitý v návrhu má vyzařovanou vlnovou délku $\lambda = 1550$ nm, a jak již je zmiňováno v kapitole *Stabilita optické trasy*, index lomu na této vlnové délce má hodnotu $n \approx 1,4475$. Tuto hodnotu dosazením do vzorce pro výpočet rychlosti světla v prostředí

$$v = \frac{c}{n}$$

,kde c je rychlost světla ve vakuu a n je index lomu, získáme výslednou rychlost světla v optickém vlákne, a to $v_{vlakno} = 207110506$ m \cdot s $^{-1}$.

Pokud použijeme vztah pro výpočet rychlosti v závislosti na vzdálenosti a čase $v = \frac{l}{t}$, po úpravě do požadovaného tvaru a dosazením získáme předpokládané zpoždění pro optickou trasu $t = \frac{l}{v}$. To u trasy dlouhé 14 280 m činí $t = 68,9487 \mu\text{s}$. Při měření přenosu času bylo průměrné zpoždění signálu na trase $t_{avr} = 74,1778 \mu\text{s}$. Rozdíl mezi teoretickou a změřenou hodnotou je $\Delta t = 5,2291 \mu\text{s}$. Tento rozdíl je tvořen zpožděním disperzí na konektorech a v samotném vlákne.

Příložený graf 7.2 zobrazuje rozdíl času po sobě jdoucích hodnot měření. Během prvních tří dní je vidět kmitání. To mohlo být způsobené změnami teploty, jelikož v době začátku měření 23. 2. 2018 přišla do České republiky studená fronta s průměrnými teplotami přes den kolem -7°C , případně toto kmitání mohly způsobit jiné vlivy, které se vyskytovaly pouze v průběhu víkendu. Ve zbytku měření se pak situace stabilizovala, rozdíl se již nezmenšoval a průměrná odchylka se pohybovala kolem $t = 28,3 \text{ ps}$. Dosažená přesnost měření času tedy byla 10^{-10} s .

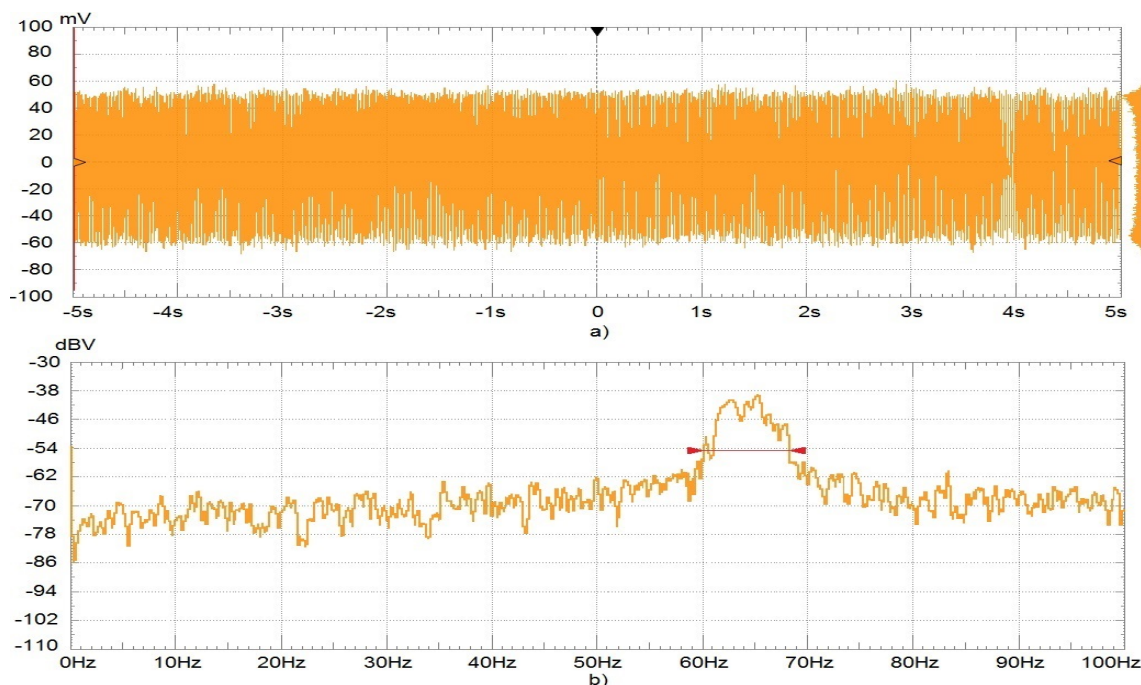


Obr. 7.2: Graf přesnosti hodin v závislosti na době měření

7.3 Ověřovací měření frekvence

U přenosu frekvence nebyl, z důvodu zajištění většího rušení a útlumu, jeden z konektorů optického vlákna plně docvaknut. Cívka s měřeným vláknem byla položena na podlaze laboratoře, aby se zabránilo přenosu otřesů stolu při měření. Na grafu

7.3b) je na začátku frekvenčního spektra vidět referenční hodnota o spektrální šířce $\Delta\nu = 1$ kHz, na grafu má hodnotu $\Delta f = 0,1$ Hz. Po průchodu záření přes měřené optické vlákno nastal posun o přibližně +643 kHz a došlo ke zvětšení šířky spektrální čáry o $\Delta\nu = 8,5$ kHz.

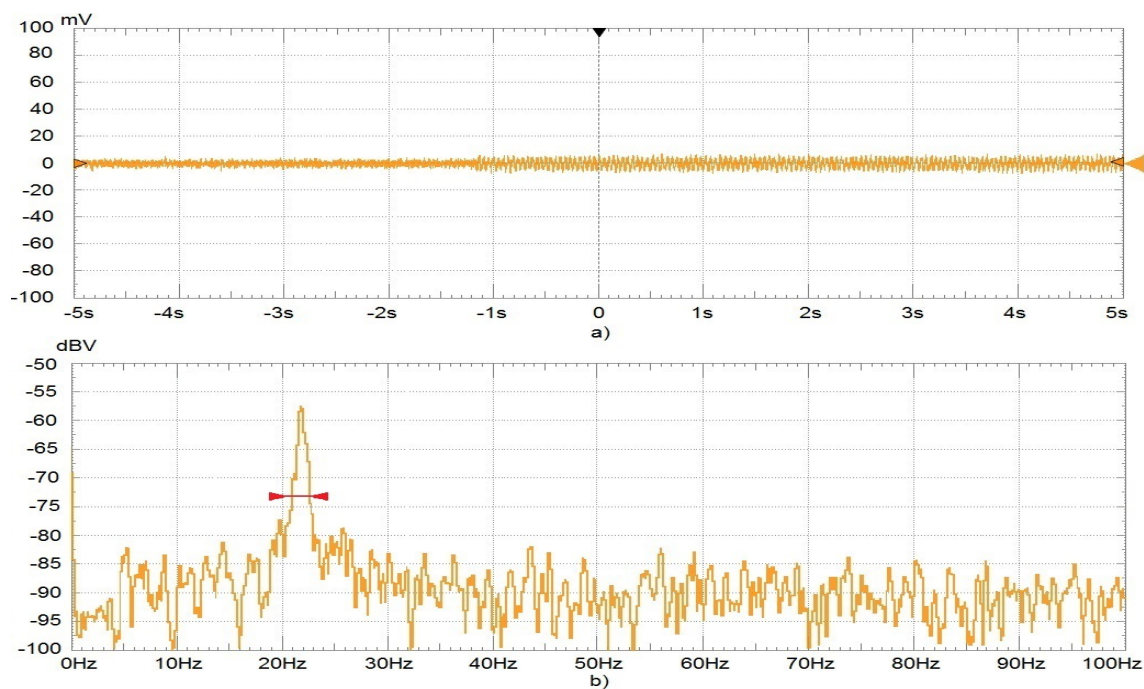


Obr. 7.3: a) Graf šumu optického signálu. b) Frekvenční posun způsobený průcho-
dem paprsku přes měřené vlákno

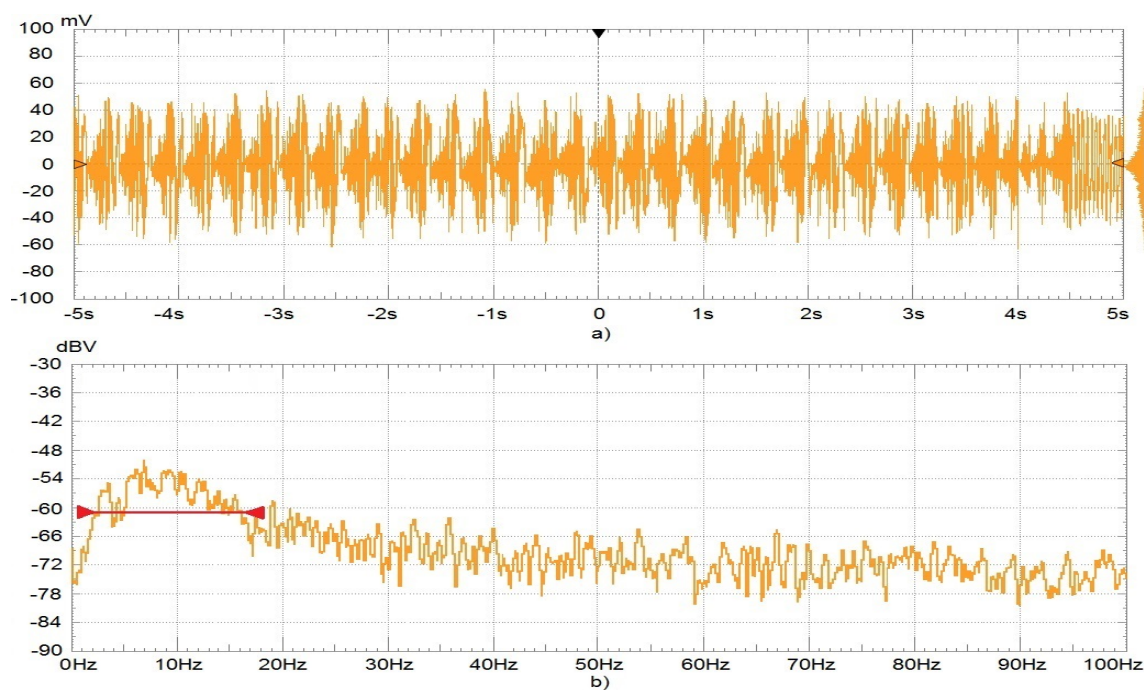
7.4 Měření frekvence

K ovlivnění přenosové trasy u měření přenosu frekvence byly vybrány tři scénáře. Při prvním byly k cívce ze dvou stran přiloženy reproduktory o celkovém výstupním výkonu 5 W. Do nich byl puštěn sinusový signál o frekvenci 1000 Hz. Naměřené hodnoty lze vidět na grafu 7.4. Pro výchozí hodnoty je bráno ověřovací měření 7.3. Na měření je vidět, že sinusové vlnění způsobilo podstatné snížení šumu, což mělo za následek podstatně menší šířku spektrální čáry a mnohem menší posun vlnové délky, než v klidovém stavu.

Druhé měření probíhalo při periodickém klepání do cívky s měřenou trasou. Z grafu šumu 7.5 a) vidíme, že frekvence klepání byla přibližně 3 Hz. V tomhle případě došlo k ještě menšímu posunu frekvence a to dokonce jen o +98,6 kHz, avšak šířka spektrální čáry vzrostla na $\Delta\nu = 127,8$ kHz.



Obr. 7.4: a) Graf šumu optického signálu. b) Frekvenční posun způsobený průcho-
dem paprsku přes měřené vlákno



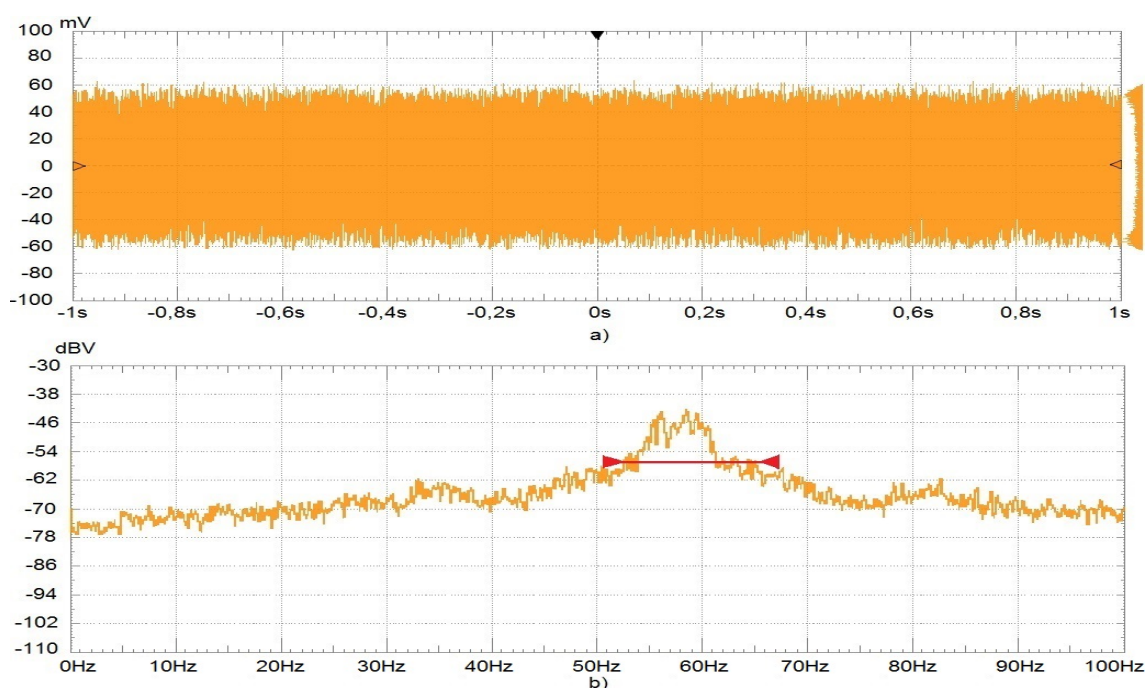
Obr. 7.5: a) Graf šumu optického signálu. b) Frekvenční posun způsobený průcho-
dem paprsku přes měřené vlákno

Poslední měření, graf 7.6, probíhalo s cívkou umístěnou do otevřeného okna vystavenou slunečnímu záření. Zde došlo k posunu o +607,3 kHz a o velké zvětšení spektrální šířky na $\Delta\nu = 127,7$ kHz. Takto velké hodnoty jsou způsobeny rozdílnou teplotou vlákna v celé trase a tím větší disperzi, a také že vlákno mělo průhlednou sekundární ochranu, která propouštěla sluneční záření do vlákna, kde mohlo interferovat s přenášeným signálem.

Vypočítaná koherenční délka použitého laseru ve vlákne podle vzorce

$$l_c = \frac{1}{\pi \cdot \Delta f} \cdot \frac{c}{n_{\text{vlákno}}}$$

, za předpokladu, že šířka spektrální čáry má Cauchy-Lorentzovo rozložení, je rovna $l_c = 65934$ m.



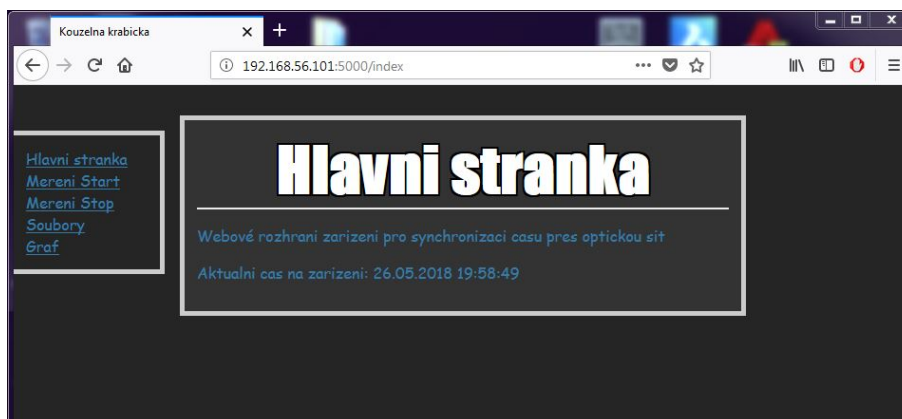
Obr. 7.6: a) Graf šumu optického signálu. b) Frekvenční posun způsobený průcho-
dem paprsku přes měřené vlákno vlákno

7.5 Webové rozhraní

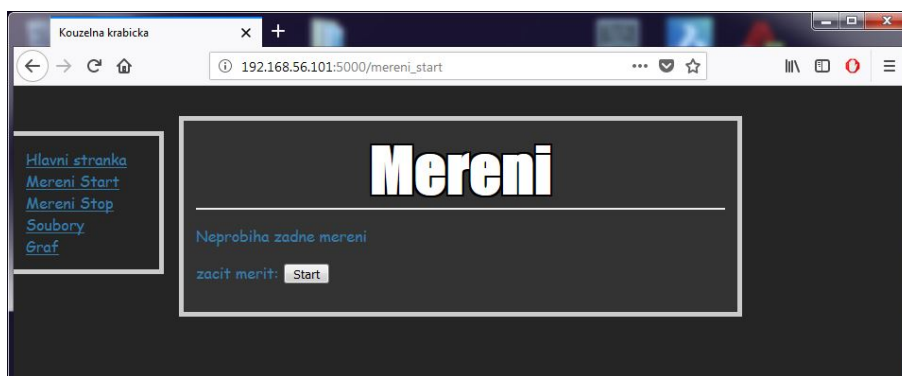
Pro doplnění zadání bylo rozhodnuto o vytvoření webového rozhraní u adaptéru pro přenos času z důvodu snadnější obsluhy, získávání dat a kontroly aktuálního stavu měření. Jako webový server slouží aplikace *Flask* běžící ve virtuálním prostředí (Virtual Enviroment) programovacího/scriptovacího jazyku python. Web umožňuje

spouštět a zastavovat měření času, vytváří vlastní hierarchii složek a souborů pro jednotlivá měření a v plánu také možnost zobrazit si graf aktuálně běžícího měření.

Pro spuštění webového serveru je nejprve potřeba, aby aktuální pracovní adresář ukazoval do složky s hlavním naprogramovaným kódem webové aplikace, poté je třeba přiřadit do proměnné `FLASK_APP` tento hlavní soubor. V tuto chvíli je možné spustit webový server Flask příkazem `flask run`. Tím začne aplikace naslouchat na ip adrese `localhost:5000`. Pro spuštění na jiné ip adrese je možné do zdrojového kódu zadat výchozí ip adresu a port.



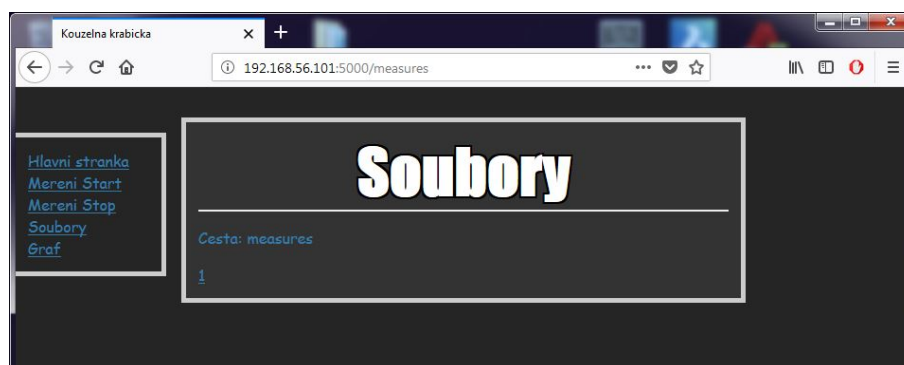
Obr. 7.7: Úvodní stránka



Obr. 7.8: Stránka pro zapnutí měření

Při spuštění nového měření, na stránce *Měření start*, se vytvoří nová složka s pořadovým číslem o jedno větším, než je aktuální největší číslo. Uvnitř této složky se vygeneruje soubor, do kterého se následně zapisuje až 3600 naměřených hodnot. Při překročení této hodnoty je vytvořen nový soubor, kam jsou nové hodnoty ukládány.

V případě, že již měření probíhá, je tato informace zobrazena spolu s datem, kdy měření započalo a neumožní spuštění dalšího měření. Informace o probíhajícím měření se zobrazí také pro stránku Měření stop.



Obr. 7.9: Hierarchická struktura složek

Stránka *Soubory* obsahuje hierarchickou strukturu složek všech měření, které byly pomocí webu spuštěny a nebyly smazány. Na jednotlivé složky je možno kliknout a tím si zobrazit její obsah. Při kliknutí na vybraný soubor by se měl zobrazit graf průběhu zpoždění v závislosti na čase měření. Bohužel se zobrazování grafu nepodařilo zprovoznit.

Jednotlivé soubory je také možno, pomocí tlačítka “stáhnout” umístěného vedle každého souboru, stáhnout.

Graf umožňující kontrolovat aktuálně spuštěné měření se do konce odevzdání práce nepodařilo zprovoznit, takže poslední položka v menu, *Graf*, zatím odkazuje pouze na prázdnou stránku s nadpisem.

8 Závěr

Po nastudování jednotlivých metod a problémů, které přenos přesného času a stabilní frekvence po optickém vlákně přináší, byly tyto poznatky převedeny do podoby návrhu měření. Ověření funkčnosti návrhu přineslo požadované údaje, které umožnily korekce pro výsledný návrh měření.

Měření přenosu času bylo z důvodu již zkonstruovaného adaptéru na tento přenos zaměřeno na přenos přes velkou vzdálenost, zatímco u měření přenosu frekvence byla pozornost více soustředěna na samotné účinky ovlivňující přenos, ale nebylo vykonáno měření na reálné trase. To by mohlo být provedeno v případě pokračování v této studii, stejně jako provedení měření na různých trasách.

Literatura

- [1] HAMERNÍK Jan. *Historie definic a etalonů základních fyzikálních veličin soustavy SI*. PhD thesis, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta pedagogická, Katedra matematiky, fyziky a technické výchovy, 2013. URL: [online] [cit. 2017-10-11] <<http://theses.cz/id/70iv00/>>.
- [2] Microsemi. Chip scale atomic clock (csac). [online] [cit. 2018-4-3], 4 2018. URL: <<https://www.microsemi.com/product-directory/clocks-frequency-references/3824-chip-scale-atomic-clock-csac>>.
- [3] LUKÁŠ Michal. Laserové diody 2 - typy a struktury laserových diod. *Elektrorevue*, 2001(43), 2001. URL: [online] [cit. 2017-11-15] <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01043/index.html>>.
- [4] MACHE W. SMOTLACHA V., KUNA A. Time transfer using fiber links. *IEEE Xplore*, 2010. URL: [online] [cit. 2017-12-9] <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6533650/>>.
- [5] Český metrologický institut. Státní etalon frekvence a času. [online] [cit. 2017-10-16], 5 2014. URL: <<https://www.cmi.cz/node/427/>>.
- [6] BIPM. Si brochure: The international system of units (si) [8th edition, 2006; updated in 2014]. [online] [cit. 2017-10-23], 10 2014. URL: <<https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/second.html>>.
- [7] MAJOR F. G. *The quantum beat: principles and applications of atomic clocks*. Springer, New York, 2 edition, 2007.
- [8] KRAJÍČEK Lukáš. *Historie automatizace a hodinové stroje v Čechách*. PhD thesis, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automatizace a informatiky., 2008. URL: [online] [cit. 2017-10-10] <<https://www.cmi.cz/node/427/>>.
- [9] PAVELEK M. Koherence záření. [online] [cit. 2017-11-04]. URL: <<http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0206.htm>>.
- [10] PASCHOTTA Rüdiger. Coherence length. *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*, 2:856, 2008.
- [11] HIGGINS V. Tomas. The three phases of lasers: solid-state, gas, and liquid. *Laser Focus World*, 1995(1):73–85, 1995. URL: [online] [cit. 2017-11-08] <<http://www.physics.umu.se/>>

- digitalAssets/186/186926_the-three-phases-of-light...-137673_lfw-1995-july-p-73-to-85-to-lab-0.pdf>.
- [12] BERTOLOTI Mario. *Masers and lasers : an historical approach*. CRC Press, New York, 2 edition, 2015.
 - [13] LUKÁŠ Michal. Laserové diody - Část 4. napájení, impulsní režim a aplikace laserových diod. *Elektrorevue*, 2002(59), 2002. URL: [online] [cit. 2017-11-15] <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02059/index.html>>.
 - [14] VIGNER Vojtěch. *Přesný čas a synchronizace procesů v průmyslových distribuovaných systémech*. PhD thesis, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra měření, 2017. URL: [online] [cit. 2018-26-4] <<https://dspace.cvut.cz/handle/10467/72722>>.
 - [15] LEVINE Judah. A review of time and frequency transfer methods. *Metrologia*, 45(6):162–174, 2008.
 - [16] NIST. Common view gps time transfer [updated august 25, 2016]. [online] [cit. 2017-11-20], Aug 2016. URL: <<https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/atomic-standards/common-view-gps-time-transfer>>.
 - [17] Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Dcf77. [online] [cit. 2018-7-5]. URL: <<https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt4/fb-44/ag-442/dissemination-of-legal-time/dcf77.html>>.
 - [18] ZEŽULKA František and HYNČICA Ondřej. Synchronizace v distribuovaných řídicích systémech: Precision time protocol (ptp) podle ieee 1588. *Automa - Časopis pro automatizační techniku*, 2, 2010. URL: [online] [cit. 2018-7-5] <http://automa.cz/cz/casopis-clanky/synchronizace-v-distribuovanych-ridicich-systemech-precision-time-protocol-p02_40557_5798/>.
 - [19] HEDEKVIST Per Olof and EBENHAG Sven-Christian. Time and frequency transfer in optical fibers. In *Recent Progress in Optical Fiber Research*, pages 371–386, Croatia, 2012. In-Tech. URL: [online] [cit. 2017-11-29] <<http://www.intechopen.com/books/recent-progress-in-optical-fiber-research/time-and-frequency-transfer-in-optical-fibers>>.
 - [20] ITU G.694.1. Spectral grids for wdm applications: Dwdm frequency grid. [online] [cit. 2017-12-3], Feb 2012. URL: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-I/en>>.

- [21] Prof. Ing. FILKA Miloslav CSc. a kol. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Centa, Brno, 2 edition, 2017.
- [22] Ltd. AD-net Technology Co. Optical power loss (attenuation) in fiber access – types, values and sources. [online] [cit. 2017-27-5], 12 2008. URL: <<http://www.ad-net.com.tw/optical-power-loss-attenuation-in-fiber-access-types-values-and-sources/>>.
- [23] Ltd. Furukawa Electric Co. Optical fiber cable with allwave® fiber. [online] [cit. 2017-27-5], 2003. URL: <https://www.furukawa.co.jp/review/fr023/fr23_23.pdf>.
- [24] PASCHOTTA Rüdiger. Fibers. *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*, 2:856, 2008.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

BCD	Binary Coded Decimal
BEV	Bundesamt für Eich - und Vermessungswesen
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
CGGTTS	Common GNSS Generic Time Transfer Standard
CW	Continuous Wave
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
DCF77	Deutschland Long Wave Signal Frankfurt Frequency 77
DFB	Distributed Feedback Laser
FFT	Rychlá Fourierova Transformace
FPGA	Field Programmable Gate Array
GLONASS	Globalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistěma - Ruská verze GPS
GNSS	Globální družicový polohový systém - Global Navigation Satellite System
GPS	Global positioning system
IoT	Internet věcí - Internet of Things
K	Kelvin
LAN	Local Area Network
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LORAN	Long Range Navigation
MASER	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MEO	Medium Earth Orbit
NTP	Network Time Protocol
PPS	Puls per Second
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PTP	Precision Time Protocol
Q-switching	Quick switching
SFP	Small Form-factor Pluggable
SNTP	Simple Network Time Protokol
TAI	Mezinárodní atomový čas - International Atomic Time
TIC	Time Interval Counter
ÚFE	Ústavem fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR
WDM	Wavelength Division Multiplexing

A Obsah přiloženého CD

/	.....	kořenový adresář přiloženého CD
└─	Bakalářská_práce_xkrato38.pdf	..... Elektronická verze bakalářské práce
└─	Webový_server	..... Hlavní adresář webového serveru
└─	measures	.....složka pro ukládání naměřených dat
└─	static	.....složka pro statické soubory (.CSS, .js,...)
└─	export-data.js	..... Soubor nutný k funkci grafu
└─	exporting.js	..... Soubor nutný k funkci grafu
└─	highstock.js	..... Soubor nutný k funkci grafu
└─	jquery.js	.....Soubor nutný k funkci grafu
└─	style.css	.....Soubor grafické konfigurace webu
└─	templates	.....Složka se souboru html
└─	graf.html	..... Stránka grafu
└─	index.html	..... Hlavní stránka webu
└─	layout.html	..... Šablona webu
└─	mereni_start.html	..... Stránka spouštění měření
└─	mereni_stop.html	.....Stránka zastavení měření
└─	soubory.html	.....Stránka se souborovou hierarchií měření
└─	flask_web.py	.....Hlavní kód webové stránky
└─	measure.py	.....Kód pro obsluhu měřicí aplikace a zpracování dat
└─	mylibrary.py	..... Pomocná knihovna